

# 核结构研究的几个里程碑与中国核结构研究 20 年

中国核物理学会核结构专业委员会

**摘要** 原子核物理学已成为人类社会发展不可或缺的重要组成部分。人们对于核结构的认识, 有如下几个里程碑: 原子核的发现, 原子核的组成及其粗块性质, 原子核壳结构, 形变与集体运动(转动与振动), 对关联与超导性, 高自旋态, 奇异变形核态, 奇特原子核, 超重原子核等。经过几代人的努力, 中国的原子核结构研究也经历了从无到有、从弱到强的发展历程。特别是近二十年以来, 中国核结构领域在人才培养、学科地位、文章发表、学术会议等国际舞台都有一席之地, 做出了一些原创性的成果。本文将扼要介绍 20 年来中国核结构研究的成果。

**关键词** 原子核结构 里程碑 中国

## 1 原子核的发现

E. Rutherford 的  $\alpha$  粒子对原子的散射实验<sup>[1]</sup>, 发现  $\alpha$ -粒子大角度偏转的现象, 确立原子有一个“核”, 从此诞生了原子核物理学科。按照 Rutherford 的原子模型, 原子的全部正电荷和几乎全部质量都集中在“核”上, 其半径( $\sim 10^{-14}\text{m}$ ) 远比原子半径( $\sim 10^{-10}\text{m}$ ) 小, 核外有若干电子围绕原子核旋转。

原子核的发现导致原子结构的研究。按照经典电动力学, 在原子中加速运动的电子将不断发射出频率连续分布的辐射, 因而电子的运动是不稳定的。对于此问题的探索导致了 N. Bohr 早期的量子论(1913 年) 和量子力学的诞生(1925—1927 年)。同时, 人们也开始思考“原子核是由什么组成的?”

## 2 原子核的组成及其粗块性质的研究

20 世纪 30 年代以前, 人们已在实验上发现的比原子更小的实物粒子, 只有电子、质子和  $\alpha$  粒子。有人曾设想原子核由电子和质子组成, 但这种假设存在严重困难: (1) 在统计性上与实验尖锐矛盾。例如, 氮原子核 N, 根据它在周期表中的位置及其原子量, 按此假设, 应由  $14\text{p}+7\text{e}$  组成, 而质子和电子均为费米子, 21 个费米子组成的体系也应为费米子。但根据氮分子的转动光谱线强度交替变化的规律, 判明 N 核应为玻色子。(2) 与不确定度关系矛盾。若要把电子束

缚在核内( $\sim 5 \times 10^{-15}\text{m}$ ), 按不确定度关系, 其动量不确定度  $\Delta p \sim \hbar/\Delta x$ 。由于电子质量非常小, 其能量为  $E = (p^2c^2 + m^2c^4)^{1/2} \approx pc \sim \hbar c/\Delta x \sim 40\text{MeV}$  的量级。但原子核  $\beta^-$  衰变放出的电子能量  $\sim 1\text{MeV}$ , 两者存在数量级上的差别。在 1920 年, Rutherford 曾经预言, 除了质子和电子以外, 还存在质量与质子相同但不带电荷的粒子, 他称之为中子。J. Chadwick (1932 年) 通过对铍核辐射以及其它轻核辐射的系统研究, 从实验上证实了中子的存在<sup>[2]</sup>, 并发现中子的质量与质子几乎相同。在 Chadwick 发现中子后, 人们很快认识到原子核是由质子和中子组成的。由于中子质量  $m_n \approx m_p \gg m_e$ , 不带电, 自旋也是  $\hbar/2$ , 上面提到两方面的困难都迎刃而解。例如, 氮核是由 7 个质子和 7 个中子组成, 因而是玻色子。其次, 由于  $m_n \gg m_e$ , 不确定度关系带来的矛盾不复存在。后来人们认识到,  $\beta^-$  衰变发出的电子, 是在衰变过程中才产生的。中子的发现, 使人们研究核结构有一个正确的出发点。30 年代至 40 年代末, 人们主要局限于从实验上对于原子核粗块性质(bulk properties)的研究, 其中包括: 原子核大小, 原子核质量与结合能, 原子核的自旋等。人们发现了核半径的  $A^{1/3}$  规律, 和核力的饱和性, 得出了原子核结合能的半经验公式(Weizsäcker-Bethe 公式等)。基于原子核的每核子结合能( $B/A$ ) 随质量数  $A$  的变化规律, 人们发现了利用原子核能的广阔前景。人们发现用中子对铀核( $^{235}\text{U}$ ) 轰击后, 裂变成两个较轻的原子核和几个中子, 并释放出大量能量, 这就为制造核弹

和建造核电站提供了理论根据. 同时, 也为利用轻核(特别是氘、氚等)进行聚变以获取核能, 提供了理论根据.

**关于原子核电荷半径的  $Z^{1/3}$  律** 对于  $\beta$  稳定线邻近的原子核的电荷分布半径  $R_c$  的实验数据分析表明,  $R_c$  系统偏离  $A^{1/3}$  律 ( $R_c = r_A A^{1/3}$ ), 即  $r_A$  随  $A$  增大而系统减小. 对于较轻核,  $r_A \sim 1.30\text{fm}$ , 而对于很重核,  $r_A \sim 1.20\text{fm}$ . 文献[3]提出了  $R_c$  的  $Z^{1/3}$  律 ( $R_c = r_Z Z^{1/3}$ ). 对  $\beta$  稳定核的分析表明,  $r_Z$  较好地保持为常数 ( $r_Z \approx 1.634\text{fm}$ ).  $R_c$  的  $Z^{1/3}$  律可以用费米气体模型来理解. 进一步考虑到原子核内中子对电荷分布地影响, 文献[4]提出了改进了的  $Z^{1/3}$  律,

$$R_c = r_Z Z^{1/3} [1 + b(\eta - \eta^*)],$$

式中  $\eta = N/Z$ ,  $\eta^*$  是相应同位素所对应的稳定核的值,  $r_Z = r_{Zd} \left(1 + \frac{5}{8\pi} \beta^2\right)$ ,  $\beta$  为核四极形变. 根据迄今已观测出的  $R_c$  的所有数据(高能电子散射, 原子 X 射线谱, 光谱的同位素移动)的系统分析, 给出  $r_{Zd} = 1.631(11)\text{fm}$ ,  $b = 0.062(9)$ . 改进了的  $Z^{1/3}$  律可以很满意地说明所有  $R_c$  数据, 并与用相对论连续谱 Hartree-Bogoliubov (RCHB) 理论给出的变化趋势相符.

### 3 原子核壳结构

原子核组成问题搞清楚后, 人们开始了原子核微观结构的系统研究. 人们发现, 与元素周期律相似, 原子核的许多性质呈现出随中子数或质子数而周期变化的现象. 人们曾按照 Pauli 原理和电子壳结构成功说明了化学元素的周期律. 例如, 惰性气体元素  ${}^2\text{He}$ ,  ${}_{10}\text{Ne}$ ,  ${}_{18}\text{Ar}$ ,  ${}_{36}\text{Kr}$ ,  ${}_{54}\text{Xe}$ ,  ${}_{86}\text{Rn}$  等, 都相应于电子满壳结构, 因而特别稳定, 它们总是以单原子分子的形式存在于自然界中. 原子中的电子壳结构可以用屏蔽库仑场中电子能级的分布满意地解释. 与惰性气体原子相似, 人们发现中子数  $N = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$ , 或质子数  $Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82$  的原子核也特别稳定. 特别是  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$ ,  ${}^{48}\text{Ca}$  和  ${}^{208}\text{Pb}$  等的结合能特别大, 原子核呈球形(电四极矩为零). 原子核的单中子分离能随中子数  $N$  的变化, 当  $N = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$  时, 特别大; 与此类似, 单质子分离能随质子数  $Z$  的变化, 当  $Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82$  时, 也特别大. 原子核的其它一些性质, 例如, 同质异能素数目的分布等, 也都呈现随  $N$  或  $Z$  周期变化的现象. 起初, 出于不理解, 人们称这些数为“幻数”, 而  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$ ,  ${}^{48}\text{Ca}$  和  ${}^{208}\text{Pb}$  等也被称为“双幻核”.

“幻数”之谜在 Mayer 和 Jensen 及其合作者<sup>[5]</sup> 提出的具有强自旋-轨道耦合的壳模型中, 得到了满意的解释. 原子核的壳结构(幻数)不同于原子中的电子壳结构, 原因在于单粒子所处的势场不同. 原子核中单核子所处势场可以用修正了的谐振子势(或球方势阱)+强自旋-轨道耦合模型来近似描述. Mayer 和 Jensen 及其合作者的强自旋-轨道壳模型是原子核结构的所有微观理论的出发点. Mayer 和 Jensen 及其合作者的强自旋-轨道壳模型(球形核)能级系以及后来 S.G.Nilsson 等人的轴对称变形核的强自旋-轨道壳模型能级系<sup>[6]</sup>, 已成为实验核物理学工作者整理各种实验数据(能谱, 自旋, 宇称, 各种电磁性质, 电磁跃迁, 核反应等)的不可或缺的依据, 是一个了不起的贡献. 人们已注意到, 既然原子核是一个具有强相互作用的多粒子体系, 为什么会呈现出独立粒子(壳)模型的特征? 这是一个理论上很深刻的问题. 有人认为, Pauli 原理和 Heisenberg 的不确定度关系在这里起了重要作用.

从壳模型出发, 还可以给出核矩的很好描述. 在实验方面, 自 90 年代中期起, 我国先后在中国原子能科学研究院  $2 \times 13\text{MV}$  和  $2 \times 1.7\text{MV}$  串列加速器上建立了用于纳秒-微秒量级寿命核态核矩测量的时间微分扰动角分布谱仪, 亚皮秒和皮秒量级核态核矩测量的瞬态场离子注入扰动角分布谱仪, 毫秒-几百秒量级核态核矩测量的  $\beta$ -放射性探测 NMR 和 NQR 谱仪. 利用这些装置, 开展了核矩测量, 发展了核矩-核结构谱学, 进行高速旋转和不稳定核的结构和性质研究, 取得了一些研究成果. 特别在  $A \sim 80$  区, 首次观察到  $g$ -因子随自旋的变化会受到质子和中子拆对顺排的调制, 证实了  $g$ -因子峰型结构的理论预言<sup>[7]</sup>.

**赝自旋对称性** 在 Mayer 和 Jensen 及其合作者提出的原子核壳模型中, 单粒子谱中的自旋伙伴态有较大的分裂. 他们利用大的自旋-轨道劈裂解释了原子核的幻数, 为原子核的壳层模型提供了坚实的基础. 30 多年前, 在研究原子核的单粒子实验能谱时, Arima 与 Hecht 分别与其合作者同时发现了原子核的赝自旋对称性. 对于总角动量  $j$  相差 1、轨道角动量  $l$  相差 2 的两条单粒子能级, 若引入赝量子数  $\tilde{l} = l \pm 1$ 、 $\tilde{j} = j$  和  $\tilde{s} = s$ , 这两个态则成为一对赝自旋伙伴态. 赝自旋-轨道劈裂比自旋-轨道劈裂小得多, 因此这个现象被称为原子核的赝自旋对称性<sup>[8, 9]</sup>. 原子核的赝自旋对称性发现以后, 人们一直在探索其起源. 直到最近, 赝自旋对称性才被认识到是核子 Dirac 旋量的一种相对论对称性<sup>[10]</sup>. 在 Dirac 核子满足的运动方程中, 如果

标量势(为负)和矢量势(为正)抵消, 则有赝自旋对称性. 赝轨道角动量子数实际上就是核子 Dirac 旋量波函数的小分量所对应的量子数. 在实际的原子核中, 由于标量势和矢量势虽然不严格抵消, 但由于这两种势的大小接近、符号相反, 因此赝自旋对称性近似成立<sup>[11]</sup>. 求解核子满足的 Dirac 方程不仅可以给出正能量态, 而且也可以给出负能量态(对应着反核子态)<sup>[12]</sup>. 相应地, 原子核的反核子谱中可能存在一种新的对称性-自旋对称性. 它的起源与核子谱的赝自旋对称性的起源相同, 但是比赝自旋对称性近似更好. 近年来, 我国科学工作者在该领域作了很多工作<sup>[11-13]</sup>.

在壳模型基础上的平均场加对力的模型是核结构研究中提出较早的模型之一. 为了克服 BCS 和 HFB 方法的弊病, 我国核结构理论工作者较早考虑粒子数守恒的组态能量截断方法并取得了较大的成功<sup>[14]</sup>. 当原子核形状发生变化时, 核子感受到的平均场也在变化. 这个变化是绝热的还是非绝热的, 平均场是否总是存在等问题, 理论物理所的郭璐等在组态限制的 HF 理论框架下及三轴形变下的 Gogny 力的 HFB 理论框架下, 对此做了讨论, 并给出平均场近似被破坏的条件<sup>[15]</sup>.

赵玉民及其合作者使用随机相互作用下多体系统的规则结构和基本性质, 提出基态角动量的几率和只包含某一个吸引的两体力的哈密顿量给出基态为该角动量的次数成正比, 澄清了随机相互作用下偶核基态自旋为零占主导地位哈密顿量的相关性. 这一方法适用各种不同的体系, 是目前为止本领域内较成功的方法之一<sup>[16]</sup>.

### 3.1 IBM 及相关模型

为了描述原子核的基态和低激发态, 还必须考虑原子核中核子之间的剩余相互作用. 原子核剩余相互作用中最重要的就是单极对力和四极相互作用, 其中自旋为零和 2 的集体对在低激发组态中起主导作用. 由此催生了相互作用玻色子模型(IBM).

20 世纪 70 年代中期, Arima 和 Iachello 提出原子核结构的相互作用玻色子模型, 我国几代学者, 包括杨立铭、徐躬耦、周孝谦、杨泽森、陈金全、孙洪洲、韩其智、张玫、赵恩广、吴华川、卢大海、刘庸、王稼军、龙桂鲁、刘玉鑫、潘峰、桑建平等, 先后开展了相关研究工作, 在与之相关的各个方面都取得了可喜的成果.

• 孙洪洲等人提出确定多粒子系统的母分系数(CFP)的新方法, 编制的相应计算程序被收录入

国际计算物理程序库, 利用该程序可以得到任意有物理意义的玻色子或费米子系统的任一角动量态的重复度和单体及两体母分系数. 提出检验确定多粒子体系本征值问题的标准和方法<sup>[17]</sup>.

• 孙洪洲等人给出 IBM 的波函数的解析形式, 说明三体相互作用的效应, sdgIBM 的代数结构, 提出  $U(6/12)$  超对称模型, 使超对称模型可以实际描述奇  $A$  核低激发态的性质, 给出 IBM2 (区分质子玻色子和中子玻色子) 的完整的代数结构和群表示约化规则, 并具体计算了一些原子核低激发态的性质, 系统讨论了原子核的超对称模型的代数结构, 分析了可以统一描述四极形变和八极形变核态的 spdfIBM, 讨论了四极形变和八极形变对原子核低激发谱的影响, 发展完善了描述轻核的 IBM(IBM4) 的代数结构、群表示约化规则, 并找出一些代表核实例<sup>[18]</sup>. 吴华川、周孝谦等将原始的 sdIBM (仅包含 s 玻色子和 d 玻色子) 推广到 sdgIBM.

• 刘玉鑫、孙洪洲、张禹顺等人以及张占军、桑建平、刘庸等人将 IBM 与 Glauber 散射理论相结合, 不仅简化了计算, 还较好地描述了电子与核的深度非弹性散射现象.

• 潘峰、陈金全等给出 IBM 的各种对称性的变形李代数的实现方式. 刘玉鑫等提出一个可以同时考虑超形变核态的对相互作用和拆对效应及多体作用的超对称模型, 较好地解决了超形变核态的动力学转动惯量的“反转”、“全同带”和“ $I=4$  分岔”等现象的统一描述问题, 并说明这些对传统核多体理论提出挑战的现象的物理机制, 找到处于从振动到不定轴转动和从振动到定轴转动的相变临界点附近的一些原子核实例.

• 杨立铭、杨泽森、卢大海、刘庸等提出直接在费米子模型空间内构造近似具有玻色子行为的核子关联对算符(而不采用通常流行的(物理意义不甚明显的)向玻色子空间映射的方法). 卢大海等把“粒子”的 Hartree-Fock 方法推广到“粒子对”, 以考虑多个“关联对”之间的相互作用对“关联对”结构的影响. 杨立铭、卢大海、周治宁等提出算符化的 Bogoliubov 变换以及推广了的算符化的 Bogoliubov 变换, 把单极( $S$ )和四极( $D$ )等自由度从核子自由度中分离出去, 以保证非配对自由度与配对自由度之间的相互独立性, 从而给出各集体运动自由度的(微观)独立描述<sup>[19]</sup>. 刘庸、桑建平等推广了费米子模型空间内构造的近似具有玻色子行为的核子关联对算符方法, 并利

用到sdgIBM和IBFM,较好地描述了一些核低激发态的性质.

- 吴成礼、陈金全、陈选根、冯达旋、平加仑等在IBM的物理图象启发下,在Ginocchio玩具模型的基础上,发展了费米子动力学对称性模型(FDSM).FDSM考虑了Pauli效应,可以解释 $B(E2)$ 的饱和性,并且预言了一些新的对称性<sup>[20]</sup>.

- 陈金全、潘峰、赵玉民、罗延安等人发展了壳模型的配对近似方法(NPA),潘峰等提出考虑对关联情况下精确求解的方案,较好地解决了在费米子空间中原子核集体运动的描述问题<sup>[21]</sup>.潘峰等人提出利用Bethe假定的无穷维李代数方法来严格求解该模型,并将此推广到依赖轨道对力情形和玻色子系统及其他情形,以及其它推广对力情形<sup>[22]</sup>.该工作推广了早期关于对力问题的Gaudin-Richardson模型的严格解方法.

- 陈金全等完善了IBM的内禀相干态方法,建立了IBM的 $U(5)$ ,  $SU(3)$ ,  $O(6)$ 对称性与振动、定轴转动、不定轴转动之间的对应关系.刘玉鑫等提出描述转动驱动的原子的晕态由振动到定轴转动相变描述方法,并说明这种相变的物理机制.

- 赵玉民及其合作者结合壳模型母分系数的正交性、组态空间维数等,推导出一系列 $6j$ 系数和 $9j$ 系数新的求和规则;得到了3到5个单轨道模型空间的全同费米子或玻色子的总自旋确定的维数解析表达式、费米子与玻色子维数之间的对应关系式,并推广到包含同位旋量子数的情形,还得到了单轨道费米子体系在哈密顿量只包含最高级对力时本征态的渐进行为<sup>[23]</sup>.

#### 4 原子核形变与集体运动(转动与振动)

实验证明,满壳原子核呈球形,相应电四极矩为0.满壳邻近的原子核,在Mayer-Jensen壳模型的基础上,计及满壳外少数价核子(空穴)的有效相互作用,可以对激发态给出较满意的描述.满壳外有稍多核子的原子核,随着满壳外核子数的增加,原子核会发生不稳定的形变,低激发态谱呈现振动的特征.例如,实验观测出的电四极跃迁几率,  $B(E2)_{\text{实验}} \gg B(E2)_{\text{理论}}$  (单粒子计算值).远离满壳的原子核则往往发生稳定形变,而稳定形变核大多数呈现旋转椭球状,即轴对称形变.与经典力学体系的转动概念不同,一个球对称量子力学体系的转动是没有意义的.只有具有变形的量子力

学体系,才谈得上集体转动.同样,一个轴对称变形的体系对于绕对称轴(通常取为 $z$ 轴)的转动也是没有意义的,而只能讨论它对垂直于对称轴的某一轴(取为 $x$ 轴)的转动.

对于远离质子满壳和中子满壳的稳定的轴对称变形核,包括 $A \sim 23-27$ (轻核区),  $155 < A < 190$ (稀土变形核区),  $A > 225$ (铜系变形核区),以及下面要讲到的超变形核,实验已系统观测到大量的轴对称变形转动带.每一个转动带内相邻的能级之间的很大的约化电四极跃迁几率非常大,说明这些原子核有较大的稳定的四极形变.每一个转动带中的各能级(角动量为 $I$ ),用角动量沿对称轴上的分量 $K$ 来描述.Bohr与Mottelson基于对称性的考虑,给出了轴对称核的转动谱的普遍公式.例如,对于偶偶核基带( $K=0$ ),转动谱可以用二参数 $AB$ 公式

$$E(I) = AI(I+1) + BI^2(I+1)^2$$

较满意描述,式中 $A = \hbar^2/2J$ ,  $J$ 为转动惯量,上式右侧第二项可理解为振动对转动的影响,它反映随转动角动量 $I$ 增大,离心力与Coriolis力使形变(因而转动惯量 $J$ )增大,使 $E(I)$ 比刚性转子能谱 $E(I) = AI(I+1)$ 要系统略低一些.

S. M. Harris建议用 $\omega^2$ 代替 $I(I+1)$ 来描述转动谱, $\omega$ 是转动角频率,  $\hbar\omega = dE/dI_x$ , ( $x$ 为转动轴),

$$I_x = \sqrt{(I+1/2)^2 - K^2},$$

$$I_x = \sqrt{I(I+1) - (K^2 - 1/4)} \simeq \sqrt{I(I+1)}, (I \gg 1)$$

Harris的二参数 $\alpha\beta$ 转动谱公式如下:

$$E(\omega^2) = \alpha\omega^2 + \beta\omega^4,$$

根据转动谱的实验观测值 $E(I)$ ,可如下提取 $\omega$ 与角动量 $I$ 的近似关系式:

$$\hbar\omega = \frac{E(I+1) - E(I-1)}{I_x(I+1) - I_x(I-1)} \approx \frac{1}{2}E_\gamma(I+1 \rightarrow I-1).$$

Bohr与Mottelson曾经论证,Harris的 $\omega^2$ 展开,优于 $I(I+1)$ 展开.A.Klein等证明,Harris的二参数 $\omega^2$ 展开公式与Scharf-Goldhaber等的可变转动惯量模型等价.

文献[24]从Bohr哈密顿量出发,并计及振动的影响,对于非轴对称度不大的原子核,给出了转动谱二参数 $ab$ 公式(带首能量取为零)

$$E(I) = a[\sqrt{1+bI(I+1)} - 1],$$

式中对于 $K \neq 0$ 带, $I(I+1)$ 应该换为 $I(I+1) - K^2$ .实验分析表明, $ab$ 公式优于其它二参数转动谱公式<sup>[25]</sup>.

如计及 Bohr 哈密顿量的势能的非简谐项( $\propto \beta^4$ ), 则  $ab$  公式可改进为 3-参数  $abc$  公式<sup>[26, 27]</sup>

$$E(I) = a[\sqrt{1+bI(I+1)} - 1] + cI(I+1),$$

分析表明, 正常变形和超变形核的转动谱可以用  $abc$  公式很满意描述.

巨多极共振, 也是原子核的一种重要集体运动. 原子能院的张锡珍等, 发现近滴线核的低能电跃迁强度几乎可以与形状振动脱耦合; 并且与稳定核相反, 这里的同位旋矢量激发能比同位旋标量激发能低<sup>[28]</sup>. 同时还发现, 长椭球形状的原子核的  $G-T$   $\beta$  衰变与扁椭球形状的原子核的  $G-T$   $\beta$  衰变, 有明显不同. 因此, 实验上可以据此判断原子核的形状<sup>[29]</sup>.

## 5 原子核的对关联与超导性

20 世纪 50 年代末, Bohr, Mottelson 和 Pines 在系统分析了大量实验资料的基础上指出<sup>[30]</sup>: 原子核内核子之间存在很强的对关联, 由此导致集体运动中的超导性. 实验资料表明, 原子核的一系列基本性质表现出明显的奇偶差. 其中最主要的奇偶差为:

1. 质量(结合能)的奇偶差 这是早在 20 世纪 30 年代已发现的现象, 即相邻原子核中, 偶偶核最稳定, 奇偶核次之, 奇奇核最不稳定, 往往通过衰变而转化为偶偶核. 自然界中, 只有 4 个稳定的奇奇核, 即  ${}^2\text{H}$ ,  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^{10}\text{B}$  和  ${}^{14}\text{N}$ . 这表现在结合能半经验公式中的对能项.

2. 低内部激发谱型的奇偶差 实验资料系统分析表明, 奇偶核的低内部激发谱的能级密度, 可以用壳模型(球形, 或变形)的粒子(空穴)激发大致说明, 而偶偶核的低内部激发谱则出现一个明显的“能隙”(energy gap), 即基态与第一内部激发态之间存在一个明显能隙  $\sim 2\Delta > 1\text{MeV}$ , 它比壳模型能级系的单粒子能级平均间距大得多, 与低温超导金属激发谱中的能隙相似.

3. 转动惯量值及奇偶差 实验资料表明: (1) 奇偶变形核的低激发转动带的转动惯量系统大于相邻偶偶核基带的转动惯量. (2) 偶偶变形核基带的转动惯量观测值,  $\mathcal{J}_{\text{实验}} \sim (\frac{1}{3} - \frac{1}{2})\mathcal{J}_{\text{刚体}}$ . 而按 D. R. Inglis 的推转模型(不计及核子之间相互作用), 则转动惯量计算值:  $\mathcal{J}_{\text{计算}} \simeq \mathcal{J}_{\text{刚体}}$ .

20 世纪 50 年代中期, 正值金属超导性的 BCS 理论提出, 根据 Bohr, Mottelson 和 Pines 等的思想, L.S. Kisslinger, R.A. Sorensen, S.G. Nilsson 和 O.Prior 等

人随即把 BCS 方法以及准粒子概念移植到核结构理论中来, 较好地阐明了原子核性质的奇偶差现象. 但此方法用以处理原子核对关联, 存在下列严重困难: (a) BCS 理论不能认真处理不配对核子的堵塞效应(blocking effect). 尽管不配对核子的 Pauli 堵塞效应是直截了当的, 但 BCS 方法却很难处理它, 因为不同的堵塞会导致不同的准粒子基<sup>[31]</sup>. 这表现在用 BCS 方法不能很好说明实验观测到的转动惯量奇偶差的大幅度涨落. (b) BCS 方法中粒子数不守恒. 原子核的低激发态性质主要取决于价核子所处的费米面附近的单粒子能级的性质和分布. 这些价核子的数目( $\sim 10$ )并不大, 因此, 粒子数不守恒带来的问题要认真对待<sup>[14]</sup>. 用 BCS 方法来处理原子核的对关联, 人们发现难以说明如下重要事实: 1) 原子核转动惯量奇偶差的大幅度涨落; 2) 转动惯量的相加性不成立. 设处于准粒子真空态  $|0\rangle$  的原子核(例如偶偶变核基态)的转动惯量为  $\mathcal{J}_0$ , 处于一准粒子态  $|\mu\rangle$  和  $|\nu\rangle$ , 以及二准粒子态  $|\mu\nu\rangle$  的原子核转动惯量分别为  $\mathcal{J}_\mu$  和  $\mathcal{J}_\nu$ , 以及  $\mathcal{J}_{\mu\nu}$ , 按 BCS 理论(转动惯量相加性), 应该有<sup>[14]</sup>

$$R = \frac{(\mathcal{J}_\mu - \mathcal{J}_0) + (\mathcal{J}_\nu - \mathcal{J}_0)}{\mathcal{J}_{\mu\nu} - \mathcal{J}_0} = 1.$$

而实验观测表明,  $R$  系统大于 1. 按照处理原子核对关联的粒子数守恒方法(或称多粒子组态截断的壳模型计算方法), 上述困难都可以较好解决<sup>[32, 33]</sup>.

## 6 原子核高自旋态

在 20 世纪 70 年代以前, 由于实验技术的限制, 人们只能制备  $\beta$  稳定线邻近的核素以及自旋不太高 ( $I \leq 10\hbar$ ) 的核态. 从 20 世纪 60 年代开始, 重离子(HI)加速器陆续建成, 探测技术也取得重大进展, 使高自旋核态和远离  $\beta$  稳定线的核素的制备成为可能, 从而形成核物理研究前沿几个新的领域.

(HI,xn) 反应(重离子融合, 蒸发几个中子)是常用的制备高自旋核态的方法. 当入射 HI 能量较高时, 它足以克服靶核的库仑斥力而与靶核融合. 在蒸发几个中子后所形成的残核处于较高能量和自旋的激发态区, 然后经过一系列统计跃迁而处于晕线(yrast line)附近的核态. 处于晕线附近的原子核将沿晕线(或大致与晕线平行)的一系列电四极(E2)跃迁, 最后达到基态. 退激过程产生一系列离散的  $\gamma$  谱线.

A. Johnson 等人通过  ${}^{160}\text{Gd}(\alpha, 4n){}^{160}\text{Dy}$  反应研究了  ${}^{160}\text{Dy}$  的高自旋转动态. 根据所测得的谱线, 首次发现所谓回弯(backbending)现象. 利用转动谱

$E(I)$  的相邻能级之间  $E2$  跃迁的  $\gamma$  射线能量, 可提取绕  $x$  轴转动的角频率与核自旋的关系. 这样, 可以画出  $2\mathcal{J}/\hbar^2 - \hbar^2\omega^2(I)$  的曲线, 就得到回弯现象<sup>[34]</sup>. Stephens 和 Simon 对回弯的物理机制给予如下诠释, 即在回弯处内部态结构不相同的两条转动带发生了带交叉 (band-crossing). 对于偶偶核, 则是基态带与一条激发态 (称为  $S$  带) 的交叉,  $S$  带的内部态是原子核费米面邻近的一条高  $j$  闯入轨道 (high- $j$  intruder orbital) 上一对粒子被拆散所形成的 2 准粒子态<sup>[35]</sup>.

大量实验证明, 回弯是变形核高自旋晕谱中普遍存在的现象. 不仅偶偶核, 在奇偶核中也同样观测到回弯现象. 后来还观测到第 2 个回弯等现象.

**旋称反转** 变形核的转动带往往还用旋称 (signature) 来标记. 在正常变形核和超变形核中的较高自旋区, 实验观测到旋称反转 (signature inversion) 现象, 特别是奇-奇核的旋称反转现象, 已经成为高自旋态研究焦点问题之一. 在旋称反转的研究中, 长期困扰大家的一个问题是: 有些原子核的旋称反转发生在晕带的低自旋区, 在高自旋区, 旋称劈裂恢复正常; 而在另一些原子核中, 情况正好相反. 这两类情况各在什么条件下发生的规律性还有待研究. 吉林大学的刘运祚等人, 对已有的实验数据进行了分析, 用能级系统学方法, 对相应转动带带头自旋进行了修定后发现,  $A \sim 160$  和  $130$  区所有奇-奇核的晕带, 无一例外地都在低自旋区发生旋称反转, 而在高自旋区恢复正常. 而且随着中子数的变化, 反转点的自旋变化呈现出明显的规律性, 而过去两类旋称反转现象同时存在, 是由错误的自旋指定造成的<sup>[36]</sup>. 随后, 国内外的一些实验都证明了他们所作的自旋修正的可靠性<sup>[37]</sup>. 国内在该领域作了工作包括理论方面的许甫荣<sup>[38]</sup> 和郑仁蓉<sup>[39]</sup> 等人以及其他一些实验组的工作等. 关于实验方面, 这里简要介绍一下兰州张玉虎研究组的一些研究成果. 他们对旋称反转开展了深入的研究. 在长椭  $\pi i_{13/2} \otimes \nu i_{13/2}$  和扁椭  $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$  2-准粒子转动带中发现低自旋旋称反转<sup>[40]</sup>; 系统地研究了长椭  $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$  组态的旋称反转特征, 指出旋称反转表现出的系统性特征和规律与核形变的系统性变化密切相关<sup>[41]</sup>; 系统地研究了一些同位素链 (同中子素链) 核结构随中子数 (质子数) 的演化, 揭示了极缺中子 Re 核的三轴形变<sup>[42]</sup>、确定了 Yb 同位素链形状发生变化的转折点在  $^{157}\text{Yb}$ <sup>[43]</sup>.

**磁转动带** 磁转动带是原子核的一种新的转动模式. 它与通常的转动带不同, 通常发生在近球形或弱形变原子核中. 由于系统形变很小, 获得角动量最

可能的机制是质子和中子的角动量互相靠拢, 就象一把正在合拢的剪刀, 因此又形象称为“剪刀带”. 理论上, 对原子核磁转动特征的认知是从 20 世纪 90 年代初开始的<sup>[44]</sup>, 利用粒子转子模型 (PRM) 及的倾斜轴推转 (TAC) 模型均可以很好地解释剪刀带<sup>[45]</sup>. 从相对论平均场出发, 利用倾斜轴转动理论, 文献 [46] 发展了适用于磁转动研究的倾斜轴推转相对论平均场 (TCRMF) 理论. 实验上, 磁转动带首次在  $^{199}\text{Pb}$  中得以证实<sup>[47]</sup>. 目前, 已先后在  $A \sim 80, 100, 130$  和  $190$  区发现了上百例磁转动带.

**手征双重带** 原则上, 原子核很可能具有稳定的三轴形变. 在这样的原子核中, Frauendorf 和孟杰于 1997 年预言了一种全新的转动模式——手征双重带<sup>[48]</sup>, 它对应着原子核手征对称性的破缺. 手征双重带的存在也提供了稳定的三轴形变原子核存在的证据<sup>[49]</sup>. 目前, 在  $A \sim 130$  和  $100$  等核区, 实验上已经观测到 20 多例手征双重带的候选带. 吉林大学等报道了  $^{126}\text{Cs}$  手征双重带候选带的实验结果<sup>[50, 51]</sup>, 而原子能院, 近代物理所, 清华大学和北京大学等的实验组也都在这一领域进行着探索工作. 理论方面, 孟杰等人利用粒子转子模型、倾斜轴推转模型, 以及三轴的相对论平均场理论对原子核的手征性进行了深入的研究, 并预言在单一原子核中可能存在多重手征带 ( $M\chi D$ )<sup>[52, 53]</sup>.

**高  $K$  同核异能态** 原子核高  $K$  同核异能态由于有广阔的应用前景, 受到核科学领域的关注, 已经成为核物理研究的热点前沿之一. 我国核物理工作者, 从 1997 年开始, 在壳模型基础上, 实现了组态限制的形变-一对关联自洽计算, 很好预言高  $K$  态的激发能及其它结构性性质, 如: 形变、四极矩、 $g$  因子、跃迁性质, 通过形状分析可以定性分析高  $K$  态的稳定性 (寿命). 系统计算研究了,  $A=80, 130, 150, 180, 190$ , 和超重核区的高  $K$  态问题, 给出了不少对相关实验很有用的理论预言, 特别是预言了: 高  $K$  态可以增加滴线核和超重核的成活概率等<sup>[54]</sup>.

**对称性恢复-角动量投影** 从平均势场, 如 Nilsson 场、Woods-Saxon 场、Hartree-Fork (HF) 或 Hartree-Fork-Bogoliubov (HFB) 变分方法、甚至更微观的相对论平均场 (RMF), 可以求出原子核的基态. 但是, 这样得到的态角动量不是好量子数. 对于 HFB 变分方法甚至没有确定的粒子数. 此时可以用角动量投影等方法来恢复被破坏了的对称性. 其基本原理是从具有混合对称性的函数空间, 分出具有确定对称性的子空间: a) 首先构造角动量投影算符; b) 将角动量

投影算符作用于平均势场或者 HF(HFB) 给出的内禀态再进行变分, 即可获得具有好角动量量子数  $I$  及其投影  $M, K$  的核态 (包括基态和一些低能激发态). 我国学者廖继志、郑仁蓉、孙扬、陈永寿、高早春、龙桂鲁等人都在角动量投影方面, 做了一些很有价值的探索<sup>[55-57]</sup>. 陈永寿、高早春等建立“反射不对称壳模型”, 实现了对八极形变原子核的壳模型描述, 理论很好再现了实验<sup>[58]</sup>. 他们还发展了“三轴投影壳模型”, 实现了对三轴形变原子核的壳模型描述, 并对当前的一些重要热点物理问题, 如摇摆带, 手征双重带和旋称反转带等实现了统一描述, 获得新成果<sup>[59]</sup>.

## 7 高自旋超变形核态

上面讨论的变形核, 通常其四极轴对称形变度  $\epsilon_2 < 0.3$ , 称为正常变形核. 早在 20 世纪 70 年代, Bohr 和 Mottelson 就指出<sup>[60]</sup>, 当变形原子核的长轴与短轴之比为 2:1 ( $\epsilon_2 = 0.6$ ) 时, 具有合适的中子数与质子数的原子核会很稳定, 形成超变形核 (superdeformed nucleus). 早在 20 世纪 60 年代在铀系核中发现裂变同质异能态 (fission isomeric state), 可以用超变形稳定核态来说明.

实验上, 1986 年 Twin 等人利用加速到 205 MeV 的  $^{48}\text{Ca}$  离子轰击靶核  $^{108}\text{Pd}$ , 即  $^{108}\text{Pd} (^{48}\text{Ca}, 4n) ^{152}\text{Dy}$  反应, 观测到 19 条离散的  $\gamma$  谱线, 其分布的规律性, 令人惊叹不已<sup>[61, 62]</sup>. 目前已观测到成百条高自旋超变形 (SD) 带. 遗憾的是, 对于绝大多数 SD 带, 尚不清楚这些 SD 带是如何退激到正常形变 (ND) 带上去的, 因此还未能直接测定 SD 带的自旋. 正确指定 SD 带的自旋是一个重要课题.

对于自旋未测定的转动带, 人们不能从转动能谱提取第一类 (也称运动学) 转动惯量,  $\mathcal{J}^{(1)}/\hbar^2 \approx I_x \left( \frac{dE}{dI_x} \right)^{-1}$ , 但可以提取第二类 (也称动力学) 转动惯量,  $\mathcal{J}^{(2)}/\hbar^2 \approx \left( \frac{d^2E}{dI_x^2} \right)^{-1}$ . 在实验上可以用差分法近似提取它们.

对于 ND 低激发转动带, 众多实验资料肯定:  $\mathcal{J}^{(2)} > \mathcal{J}^{(1)}$ . 对于尚未测定自旋的 SD 带, 可以根据不同自旋指定下得出的  $\mathcal{J}^{(1)}$  值随  $I$  的变化, 并与  $\mathcal{J}^{(2)}$  随  $I$  的变化进行比较, 可以大致判断自旋指定是否可靠. 利用转动谱的二参数  $ab$  公式, 可以对 SD 带的自旋指定给出了很好的建议.

在实验方面, 从 1978 年 HI-13 串列加速器投入运行以来, 中国原子能科学研究院核物理所核谱组在奇

质子核转动带交叉的反常推迟、 $A \sim 130$  核区的三轴形变、 $A \sim 80$  核区的形状共存和磁转动、奇奇核旋称反转、 $A \sim 160$  核区三轴超形变、原子核的手征双重性和高自旋态能级寿命测量等项研究中获得一批结果. 建立了  $^{169}\text{Ta}$  全新的能级局图, 首次观测到  $^{167}\text{Ta}$ ,  $^{169}\text{Ta}$ , 和  $^{175}\text{Ta}$  3 个核的  $1/2[541]$  转动带的带交叉反常推迟. 在  $A \sim 160$  核区三轴超形变研究中首次观测到的三轴超形变. 这是在我国自己的实验室中观测到的第一条超形变带<sup>[63]</sup>. 目前可用探测器个数已达到 15 个, 正在研究原子核同质异能态、超形变、手征转动、磁转动与反磁转动等当前国际上的热点问题.

## 8 奇特原子核

进入 21 世纪, 人们完全有理由相信核物理即将进入一个新的发展时期. 首先, 自然界存在的原子核只有两百多个, 即使在实验室通过人工手段合成的约三千个, 也只是理论预言可能存在核素数目的三分之一; 其次, 以前核物理的知识都是基于实验上  $N \sim Z$  稳定核线附近的观测结果. 而在中子数与质子数之比很大的远离稳定线的丰中子核中, 已经发现了很多新的物理现象; 如首先在  $^{11}\text{Li}$  中所发现的中子晕现象<sup>[64]</sup>, 以及幻数的消失和产生等等. 同时, 远离稳定线的原子核研究还可以促进一些交叉学科的发展, 如正在形成新的研究热点的核天体物理, 它是微观物理与宇观物理的一个交叉. 它将回答自然界元素是从哪儿来的, 宇宙怎么从大爆炸开始演程等. 由于这些原因, 世界上很多国家都投入巨资, 建造放射性束装置, 开展远离稳定线 (奇特) 原子核的领域. 物理上, 晕核的发现动摇了原子核的集体模型的基础, 即核物质的不可压缩性. 而幻数的改变则使得所有微观模型的出发点都需要从新探讨.

自从  $^{11}\text{Li}$  的中子晕现象发现以来, 吸引了许多物理学家运用不同的理论模型对之进行解释. 从平均场的观点看来, 对于晕核, 由于其最外围价核子的结合能非常小, 因此外围的价核子可能会被填充在弱束缚的单粒子能级. 另外, 由于原子核处在弱束缚状态, 因此剩余相互作用会将核子散射到连续谱内. 同时, 离心位垒、势能弥散、弱束缚的单粒子态和剩余相互作用等对晕核起着同等重要的作用. 1996 年, 自洽考虑对关联、连续谱, 并且自然导出自旋轨道相互作用的 RCHB 理论给出了晕现象的微观自洽描述<sup>[65-68]</sup>, 并预言了可能存在多达 6 个晕核子的巨晕现象<sup>[67]</sup>. 鉴于目前实验上还很难产生文献中的巨晕 Zr 核, 文献 [69]

探索了轻核中的巨晕现象,发现在质量数大于60的丰中子Ca核以及近滴线的Ne, Na, Mg核中,也可能存在巨晕现象.这些结果对于巨晕的实验证实以及深入认识这一奇特核现象是非常重要的.

是否存在形变晕一直是核物理学家非常关心的问题<sup>[70]</sup>.在变形的晕核中可能会出现核芯和晕核子(形变)退耦合的有趣现象.此外,形变效应是<sup>11</sup>Be中出现晕现象的重要原因;质子晕核<sup>8</sup>B也可能是变形的.

在实验方面,中国科学家也取得了长足进步.通过反应总截面研究等研究手段,先后报道了<sup>23</sup>Al为可能的质子晕核<sup>[71]</sup>.RMF计算表明,<sup>23</sup>Al具有较大的形变,从而使价质子有较大的几率占据2s轨道,这可能是<sup>23</sup>Al中出现质子晕的原因之一.另外,实验上还发现了很多激发态晕<sup>[72]</sup>.RMF计算可以很好地描述这些激发态晕现象<sup>[73]</sup>.

基于相对论平均场的类壳模型(RMF-SLAP)方法<sup>[74]</sup>,结合ACCC方法或者散射相移方法等给出的共振态<sup>[75]</sup>,将是描述激发态晕核的一个有力工具.

引入超子自由度,并考虑超子-介子耦合,可以把RMF理论扩展用来研究超核.根据实验上提供的超子-核子相互作用的信息以及理论上对Ca同位素中巨晕的预言,不仅可以研究在这些奇特核中加入超子后将出现的奇特现象,而且还预言了在超核中也可能存在巨中子晕现象.在不打破中子壳层结构的情况下,加入1个或2个超子降低了中子的费米面,使得Ca超核的中子滴线核( $N=54$ )比通常的中子滴线核( $N=52$ )多两个中子.通常,核内的超子-核子相互作用要比核子-核子相互作用弱,超子态应该比相应的中子态有更大的空间弥散,从而更容易形成晕,即超子晕.由于超子的奇异数不为零,超子晕核将提供中子晕核所没有的奇异性.另外,超子的加入对核子密度影响很小,所以可以在不分散核芯的情况下生成超子晕<sup>[76]</sup>.

## 9 超重核

核科学领域中一个长期探索的基本问题就是原子核电荷和质量的上限,这已成为激励人们寻找比现有核素质量更大,电荷更多的超重核素的原动力.超重核的研究对物理学和化学有巨大的影响.稳定核的上限不仅对原子核结构,而且对理解宇宙和恒星的结构及其演化有十分重要的意义.但是,经过近半个世纪的探索,核素表右上角的边界仍然是未知的.

关于超重元素的开拓性工作可以追溯到20世纪

60年代,人们采用液滴模型加壳修正方法计算了原子核的质量和能量曲面,指出存在一些相对稳定的核素,它们在中子数和质子数平面上被不稳定的区域与已知的核素隔开,这就是后来被称为“超重元素岛”的核素<sup>[77-79]</sup>.对它们的探索是一系列重离子加速器和在这些加速器上所完成的大量实验的主要缘由.但是,直到今天,关于超重元素岛的存在仍然没有找到令人信服的证据.

超重元素宏观理论的主要困难在于从 $\beta$ -稳定线核素外推到超重核区域是否合适.近年来,在超重元素的微观理论描述方面也有了大量的工作.微观理论面临的挑战就是:无论相对论还是非相对论理论所预言的超重双幻核均依赖于所采用的相互作用.只有采用经过整个周期表中已知核素性质检验过的相互作用,才可能得出比较确切的结论.

在超重核的实验研究方面,Oganessian在20世纪70年代提议用双幻铅核为靶的冷熔合反应来合成超铀系(transactinide)核<sup>[80]</sup>.在此反应中,复合核的激发能由于<sup>208</sup>Pb的壳效应而降低,复合核经过发射一或两个中子后生成目标核.另一类反应就是热熔合反应,它采用铀系核为靶,复合核激发能高达几十个MeV,通过发射几个中子后生成目标核.经过多年的实验积累,德国GSI利用冷熔合反应合成了110,111和112号元素.利用<sup>209</sup>Bi(<sup>70</sup>Zn,n)<sup>278</sup>113反应<sup>[81]</sup>,日本在新元素合成方面取得成功<sup>[82]</sup>.俄罗斯的Dubna核物理研究所利用热熔合反应,宣布成功合成了包括118和115号元素在内的原子核.由于其合成的原子核最终的衰变产物无法确认,因此人类是否已经合成了118号元素还有待进一步验证.最近,兰州重离子加速器国家实验室成功合成<sup>265</sup>Bh与<sup>259</sup>Db是中国在超重核素合成方面的重要突破<sup>[83]</sup>,表明中国在超重元素的合成方面重要的起步.虽然目前合成的这些同位素已经非常重了,但是它们仍然不是当初设想的超重元素岛.原因就是目前发现的超重元素的中子数比预言的超重岛中心(超重双幻核)大约少20个中子.

我国在超重元素方面相关的理论研究方面还包括:1)对相关超重实验的理论描述和新幻数的探讨<sup>[84]</sup>;2)提出超重核中,基态形变、形状共存、同质异能态和高角动量同质异能态等的重要性<sup>[85-87]</sup>;3)建立了计算 $\alpha$ -衰变寿命的密度依赖结团模型、核结合能和核自发裂变寿命的新公式<sup>[88]</sup>;4)应用改进的双核模型研究合成超重元素的重离子熔合反应时,仔细考虑了一些原子核结构效应的影响.他们发现原子核形变及相对取向,对驱动势有明显的影响.当使用



能更好的包含核结构效应的驱动势时, 计算的 106-112 号超重元素的合成截面与最佳激发能, 与现有的实验数据有更好的符合<sup>[89, 90]</sup>等。

## 10 核多体理论

### 10.1 相对论核多体理论

**格林函数方法的应用** 90年代初, 有关核物质和有限核的相对论理论取得了很大的进展。一般来说, 在核结构非相对论微观计算中, 推迟效应是非常重要的。为了研究它, 就要求解相对论二体波动方程, 即 Bethe-Salpeter(BS) 方程。但是四维形式的 BS 方程很难求解。当时, 有人建议将 BS 方程等效为三维形式的近似方法。但是, 几乎所有的这些方法都忽略了推迟效应。吴式枢建立并发展了零温下严格的三维 BS 方程, 给出了等效相互作用的封闭表达式, 而且表达式的各级微扰展开式都是相对论的, 并适当地考虑了负能海和推迟效应的贡献<sup>[91]</sup>。吴式枢领导的研究小组对具体物理过程中推迟效应的贡献进行了很多研究<sup>[92]</sup>。另外, 在进行 RPA 计算时, 一致性要求也很重要。只有同时顾及正、负能态, Dirac 单粒子基才是完备的, 所以为了满足一致性的要求, 负能单粒子态也必需考虑。一般有两种方法顾及负能单粒子态的贡献。一是 Dirac 空穴理论, 另一个就是 DF 的计算方法。在计算相对论的无规位相近似(RRPA)时, DF 方法考虑了正能量的粒子-空穴对和由正能量占据态的粒子跃迁至负能态而出现的“处于负能单粒子态的粒子与正能的空穴对”的贡献。据此理论计算结果不仅可更好的符合实验且可分离出质心假态并使计算结果满足流守恒。但是, 这意味着负能海是空的, 这与 Dirac 理论相违背的。吴式枢领导的研究组首先从公式上说明了 DF 方法与 Dirac 空穴理论的联系, 并讨论了如何恰当的顾及负能海的贡献<sup>[93]</sup>。

**核内介子自由度与量子强子动力学的重整化** 目前, 相对论核多体理论仍主要建立在量子强子动力学(QHD)基础上。QHD 是可重整化的理论, 原则上可系统地计算粒子修正。但是, 强子场间存在强相互作用, 所以简单地按摄动理论进行计算是不适当的, 至少需要考虑无穷级数的部分求和。为此必须同时消除级数中各项出现的无穷大, 从而使实际计算存在严重的困难。在 70 年代, Brown 等首先利用重子谱表示研究了相对论核子-介子场理论的重整化。80 年代, 相对论自洽 Fock 近似下的重子交换自能图的重整化计算以及相对论自洽 Hartree-Fock 近似(RSHFA)下的重整

化计算方案也陆续给出。随后, 对有限密度核物质情况也有所讨论。但是 RSHFA 重整化方案很难用于实际计算, 尤其是有限密度情况。另外, 自 Hartree-Fock 自洽场近似提出以来, 在多体理论中自洽效应是一个长期受到关注的课题。吴式枢等提出了一个新的重整化计算方案, 并从理论上和数值计算上都阐明了这个方案是实际可行的<sup>[94, 95]</sup>; 应用 Dyson-Schwinger 方程及联立方程, 在重整化理论基础上较系统地研究了自洽效应对强子传播子的影响。在这一系列的工作中, 吴式枢所领导的小组还解决了一些基本问题, 如: 仅考虑矢量介子和重子场耦合时重子谱函数出现负值的原因; 考察了鬼点对重子谱函数的影响, 给出了一个得到不含鬼点的强子传播子的方法等<sup>[96]</sup>。

### 10.2 非相对论核多体理论

Brueckner-Hartree-Fock(BHF) 理论方法是 20 世纪 50 年代由 Brueckner, Bethe 和 Goldstone 等人发展起来的原子核微观多体理论方法, 是目前最为重要的微观多体理论之一<sup>[97]</sup>。自从 Brueckner 等的开创性工作以来, 许多核理论学家都致力于发展和扩展 BHF 理论并将其应用于核物质和原子核性质的研究中。近年来, 我国核物理工作者也在这方面做出了一些重要的贡献。宋宏秋等<sup>[98]</sup>通过求解关于核物质的三体 Bethe-Faddeev 问题, 研究了 BHF 方案中能量空穴线展开的收敛性这一重要问题, 结果表明: 对单粒子势采用连续性选择所得到的能量空穴线展开的收敛速度要比采用间断性选择快得多; 而且, 在连续性选择下, BHF 理论的能量空穴线展开的收敛性能够达到令人满意的程度。这一研究作为 BHF 理论方法的收敛性问题提供了理论依据。左维等通过引进基于介子交换流方法的微观三体核力, 改善了 BHF 理论对饱和点性质的描述<sup>[99]</sup>。还利用微观多体 BHF 理论和 BCS 理论, 研究了三体核力对中子星物质中超流性的影响, 预言了三体核力对中子星物质中质子超流性具有强烈的抑制作用。另外, 包含三体核力的 BHF 理论还被应用于中子星物质中 K 介子凝聚性质, 非对称自旋极化核物质对于自旋-同位旋涨落的稳定性等问题的研究中, 并取得了一些重要进展<sup>[100]</sup>。

### 10.3 少体理论方法

与多体理论方法对应的核少体理论方法, 在我国也取得了令人鼓舞的进展。中山大学鲍诚光等发展起来的通过对称性分析的方法, 用来研究少体系统的运动模式, 不但可以成功地解释很多轻原子核的性质,

还应用到原子、分子物理中,也取得了一些重要进展<sup>[101]</sup>.这些成果能连续在Phys. Rev. Lett.上发表四篇论文,就是其重要性的一个很好的说明.2005年在上海召开的国际少体会议上,我国学者也做了很多重要报告,集中反映了我国在少体问题上的进展.这里,就不详细介绍了.

## 11 与核结构相关的其它领域

**从夸克层次研究原子核** 我国科学家在“从夸克层次研究原子核”方面的主要贡献表现在如下几个方面:

- 利用北京正负电子对撞机(BEPC)实验数据开拓了重子谱研究新途径,和北京谱仪(BES)合作组合作完成了 $J/\psi \rightarrow \bar{p}p\eta$ 的分波分析工作,得到的核子激发态新结果被收入粒子数据表,这是我国在重子谱方面的第一项贡献<sup>[102]</sup>.
- 通过 $J/\psi \rightarrow \bar{n}p\pi^-$ 反应观测到两个新的 $N^*$ 共振峰<sup>[103]</sup>;对 $J/\psi \rightarrow PK^-\bar{\Lambda}$ 和 $PP \rightarrow PK^+\Lambda$ 进行了对照性的分析,发现 $N^*(1535)$ 具有很大的 $KA$ 耦合,指出其含有很大的 $[ud][us]s$ 五夸克成分,这对了解重子激发态的内部夸克胶子结构很有意义.
- 成功地解释了 $N^*(1440)$ ,  $N^*(1535)$ 和 $\Lambda^*(1405)$ 等重子激发态的一些奇特的性质<sup>[104]</sup>.同时,对新近的质子奇异磁矩为正的实验现象进行了研究,指出质子中的奇异夸克成分主要以反奇异夸克处于基态的有色集团的形式存在,而不是传统的介子云形式<sup>[105]</sup>.这两项工作通过对最轻的正宇称和负宇称重子的研究,给出了重子中五夸克成分结构的一个自洽的图象.
- 研究了多夸克态的结构.利用我们扩充发展起来的手征 $SU(3)$ 夸克模型,研究了多夸克态的结构,预言了具有高奇异数的双重子,它们被列入RHIC的实验寻找课题;也利用该模型、退定域夸克模型等模型预言了非奇异双重子和其他奇异双重子,并计划在实验中寻找<sup>[106]</sup>.
- 利用手征 $SU(3)$ 夸克模型对核力给出很好的理论解释,成功地解释了重子-重子的实验数据;也进一步应用QCD求和规则和整体色模型研究了核力,从更基本的场论来认识和获取具有QCD非微扰效应的夸克-夸克相互作用,从而对核力的来源有了更为深入的认识.
- 利用手征 $SU(3)$ 夸克模型研究了轻超核的结构,较成功地解释了轻超核和双轻超核的结构<sup>[107]</sup>.南开大

学宁平治研究组多年来一直从事与奇异性核物理有关的工作,在超核的研究中,取得很多重要进展<sup>[108]</sup>.90年代以前关于超核方面的进展,可参见厉光烈的综述文章<sup>[109]</sup>.

**原子核内的混沌** 尽管一些研究经典混沌的学者认为,“在短暂的宏观系统里,人们谈论时间趋于无穷的极限和混沌,而在永恒的微观世界里没有混沌”.但是,很多学者也包括我国的一些核物理工作者,仍然在努力地探讨微观世界里,特别是原子核的运动中,有没有混沌的问题.1982年,Haq, Pandey和Bohigas分析了27种原子核的1407条共振能级的实验数据,计算了能级间距的分布函数和平均谱刚度,发现其结果与无规矩阵理论中的GOE谱的结果惊人地一致<sup>[110]</sup>.这一结果推进了核物理学中的混沌研究.

南京大学徐躬耦的部分研究成果,可参见其专著“量子混沌运动”<sup>[111]</sup>.兰州近代物理所的李君清等研究了在大的八极形变条件下单核子的运动形态,得到了如下的结论<sup>[112]</sup>: 1. 当经典粒子在封闭自治哈密顿系统中的运动时,其轨道指数性不稳定性动力学原因是由于势能面高斯曲率的负值所致,这是对著名KAM定理的关于产生混沌运动的定性要求的定量补充. 2. 在适当的初始条件下,将经典相空间的一束轨道与量子力学的相干态选为初始态,则在经典近似下均满足相同的刘维方程.相干态在轴对称谐振子势加八极形变势中的传播特征表明,相干态的传播宽度随时间的扩散行为与相应经典系统的规则,混沌行为有一一对应的关系,且同样有初始位置灵敏性.计算表明,波包传播的总测不准度随时间的增长率约为李雅普诺夫指数的2倍,这证实了顾雁的预言,该预言是对量子混沌的一个定量的度量.原子能院的顾建中等人用量子混沌观点对原子核的巨超形变作了探讨<sup>[113]</sup>.他和Weidenmueller一起,运用超对称性技术导出了超形变带的带外衰变强度的解析表达式<sup>[114]</sup>.他们的文章发表后,引起了理论与实验两方面的普遍关注,引发了在美国,德国,澳大利亚等国的各大原子核物理实验室的许多新的实验.美国Argonne国家实验室称赞他们的工作为超形变转动带的带外衰变研究奠定了理论基础.

**天体物理相关的核结构** 原子能院,北京大学和理论物理所的研究组,自20世纪90年代中期,积极与国内天文界共同开展了核天体物理研究.对宇宙中元素演化中的一些关键核的结构性质,进行了研究.他们还与国内很多同行一起,分别对中子星性质进行了探索性的研究,取得了一些令人鼓舞的结果<sup>[115-118]</sup>.

## 12 展望

原子核物理研究进入新的世纪之际,蓬勃兴起的新一代放射性核束装置和探测设备的研制也为核物理的发展带来全新的机遇.我国的大科学工程——兰州重离子加速器冷却储存环即将建成,日本的放射性束工厂即将在年底建成,德国 GSI 耗资约 10 亿欧元的 FAIR 项目已经启动,美国 DOE 科学办公室在递交国会的五年计划中,将于 2011 年启动 RIA 项目的工程和设计基金.正如 19 世纪末天然放射性的发现孕育了核物理的诞生、核能的利用和核武器的出现一样,新一代放射性核束装置和探测设备必将对基础研究和国民经济建设产生巨大而深远的影响.经过全国同行的共同努力以及全国原子核结构专业委员会协调组织,中国的原子核结构研究也经历了许多风风雨雨,从弱到强的发展历程,进入了全新的发展阶段.

在实验研究方面,中国科学院近代物理研究所即

将完成的 HIRFL-CSR 大科学工程以及中国原子能科学研究院启动的 BRIF 二期工程,将为我国核物理基础研究进入国际前沿,在放射性核束物理和不稳定原子核研究领域占有一席之地提供极为有利的条件.

在理论研究方面,我国科学家在国际学术杂志上发表的学术论文无论在数量还是质量上都有很大提高.在几乎所有的国际学术刊物上都有中国学者的文章.在原子核结构的一些重要研究领域,我国科学工作者都有一些重要的预言和原始创新.已有越来越多的学者活跃在各种重要的学术会议作大会邀请报告或者担任各种 session 主席.同时,全国的核结构同行在吸引优秀人才投身核科学事业,培育一些具有国际影响的科技人才的方面也做出了重要贡献.

感谢顾建中、李君清、廖继志、刘玉鑫、刘运祚、潘峰、任中洲、许甫荣、沈彭年、杨春祥、张海霞、赵玉民、郑仁蓉、朱胜江、朱升云、左维等人的讨论和提供的信息.

## 参考文献(References)

- Rutherford E. Phil. Mag., 1911, **21**: 672
- Chadwick J. Nature, 1932, **129**: 312
- ZENG J Y. Acta Physica Sinica, 1957, **13**: 357; 1975, **24**: 151 (in Chinese)  
(曾谨言. 物理学报, 1957, **13**: 357; 1975, **24**: 151)
- ZHANG S Q, MENG J, ZHOU S G et al. Eur. Phys. J., 2003, **A13**: 285
- Mayer M G. Phys. Rev., 1949, **75**: 1969; 1950, **78**: 16,22; Haxel O, Jensen J H D, Suess H E. Phys. Rev., 1949, **75**: 1766; Z. Phys. 1950, **128**: 295; Mayer M G, Jensen J H D. Elementary Theory of Nuclear Shell Structure, Wiley, 1955
- Nilsson S G. Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk., 1955, **29**: 16; Nilsson S G et al. Nucl. Phys., 1969, **A131**: 1
- ZHU S Y, LUO Q, WANG Y G et al. Hyperfine Interactions, 2001, **136/137**: 205—209; YUAN D Q, ZHENG Y N, ZHOU D M et al. Chin. Phys. Lett., 2005, **22**(7): 1628—1630
- Arima A, Harvey M, Shimizu K. Phys. Lett., 1969, **B30**: 517
- Hecht K D, Adler A. Nucl. Phys., 1969, **A137**: 129
- Ginocchio J N. Phys. Rep., 1999, **315**: 231
- MENG J, Sugawara-Tanabe K, Yamaji S et al. Phys. Rev., 1998, **C58**: R628; MENG J, Sugawara-Tanabe K, Yamaji S et al. Phys. Rev., 1999, **C59**: 154
- ZHOU S G, MEMG J, Ring P. Phys. Rev. Lett., 2003, **91**: 262501
- GUO J Y, FANG X Z, XU F X. Nucl. Phys., 2005, **A757**: 411—421; GUO J Y, WANG R D, FANG X Z. Phys. Rev., 2005, **C72**: 054319; XU Q, ZHU S J. Nucl. Phys., 2006, **A768**: 161—169
- ZENG J Y, CHENG T S. Nucl. Phys., 1983, **A405**: 1; WU C S, ZENG J Y. Phys. Rev. Lett., 1991, **66**: 1022; ZENG J Y et al. Phys. Rev., 1994, **C50**: 746
- GUO L et al. Phys. Rev., 2005, **C71**: 024315; GUO L et al. Nucl. Phys., 2004, **A740**: 59
- ZHAO Y M, Arima A, Yoshinaga N. Phys. Rep., 2004, **400**: 1
- HAN Q Z et al. Comput. Phys. Commun., 1995, **85**: 463; LIU Y X et al. Comput. Phys. Commun., 1992, **70**: 154
- HAN Q Z et al. Phys. Rev., 1987, **C35**: 786
- YANG L M. Prog. Part. Phys. Nucl. Phys., 1983, **9**: 147; YANG L M et al. Nucl. Phys., 1984, **A421**: 229c
- WU C L et al. Phys. Rev., 1987, **C36**: 1157
- CHEN J Q. Nucl. Phys., 1997, **A626**: 686; ZHAO Y M et al. Phys. Rev., 2000, **C62**: 014304
- PAN F, Draayer J P, Ormand W E. Phys. Lett., 1998, **B422**: 1; PAN F, Draayer J P. Phys. Lett., 1998, **B442**: 7; Nucl. Phys., 1998, **A636**: 156. PAN F, Draayer J P, LUO Y A. Phys. Lett., 2003, **B576**: 297; PAN F, Gueorguiev V G, Draayer J P. Phys. Rev. Lett., 2004, **92**: 112503
- ZHAO Y M, Arima A. Phys. Rev., 2005, **C71**: 047304; ZHAO Y M, Arima A. Phys. Rev., 2003, **C68**: 044310
- WU C S, ZENG J Y. Commun. Theor. Phys., 1987, **8**: 51
- PING J L et al. Phys. Rev., 1991, **C43**: 2224; XU F X, WU C S, ZENG J Y. Phys. Rev., 1989, **C40**: 2337; HU Z X, ZENG J Y. Phys. Rev., 1997, **C56**: 2523
- HUANG H X, WU C S, ZENG J Y. Phys. Rev., 1989, **C39**: 1617
- LIU S X, ZENG J Y. Phys. Rev., 1998, **C58**: 3266

- 28 Hamamoto I, ZHANG X Z. Phys. Rev., 1998, **C58**: 3388; Hamamoto I, Sagawa H, ZHANG X Z. Nucl. Phys., 1997, **A626**: 669
- 29 Hamamoto I, ZHANG X Z. Z. Phys., 1995, **A358**: 145; Frisk F, Hamamoto I, ZHANG X Z. Phys. Rev., 1995, **C52**: 2468
- 30 Bohr A, Mottelson B R, Pines D. Phys. Rev., 1958, **110**: 936
- 31 Rowe D J. Nuclear Collective Motion, Methuen, London, 1970
- 32 ZENG J Y, LEI Y A, JIN T H et al. Phys. Rev., 1994, **C50**: 746
- 33 LIU S X, ZENG J Y. Phys. Rev., 2002, **C66**: 067301
- 34 Johnson A, Ryde H, Sztarker J. Phys. Lett., 1975, **B34**: 605
- 35 Stephens F S, Simon R S. Nucl. Phys., 1972, **A183**: 257
- 36 LIU Y Z et al. Phys. Rev., 1996, **C54**: 719—729. LIU Y Z et al. Phys. Rev., 1998, **C58**: 1849—1852
- 37 LU J B et al. Phys. Rev., 1999, **C59**: 3461—3464. LU J B et al. Phys. Rev., 2000, **C62**: 057304
- 38 XU F R et al. Nucl. Phys., 2000, **A669**: 119—134
- 39 ZHENG R R et al. Phys. Rev., 2001, **C64**: 014313
- 40 XIE C Y, ZHOU X H, ZHANG Y H et al. Phys. Rev., 2005, **C72**: 044302; ZHANG Y H et al. Euro. Phys. J., 2002, **A13**: 429-433; ZHANG Y H et al. Phys. Rev., 2004, **C70**: 057303
- 41 ZHANG Y H et al. Phys. Rev., 2003, **C68**: 054313
- 42 ZHOU X H et al. Euro. Phys. J., 2004, **A19**: 11—23; Phys. Rev., 2004, **C70**: 014304; SONG L T et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 037302
- 43 ZHANG Y, ZHOU X H et al. Eur. Phys. J., 2002, **A14**: 133
- 44 Frauendorf S, MENG J, Reif J. Proceeding of the Conference on Physics from Large  $\gamma$ -Ray Detector Arrays, Vol.II, 1994, 52
- 45 Frauendorf S, MENG J. Z. Phys., 1996, **A365**: 263
- 46 Madokoro H, MENG J, Matsuzaki M et al. Phys. Rev., 2000, **C62**: 061301
- 47 Neffgen M, Baldisiefen G, Frauendorf S et al. Nucl. Phys., 1995, **A595**: 499
- 48 Frauendorf S, MENG J. Nucl. Phys., 1997, **A617**: 131
- 49 Starosta K, Koike T, Chiara C J et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**: 971
- 50 LI X F et al. Chin. Phys. Lett., 2002, **19**: 1779
- 51 WANG S Y et al. Phys. Rev., 2006, **C74**: 017302
- 52 PENG J, MENG J, ZHANG S Q. Phys. Rev., 2003, **C68**: 044324; Chin. Phys. Lett., 2003, **20**: 1223
- 53 MENG J, PENG J, ZHANG S Q et al. Phys. Rev., 2006, **C73**: 037303
- 54 XU F R, ZHAO E G, Wyss R et al. Phys. Rev. Lett., 2004, **92**: 252501; XU F R, Walker P M, Wyss R. Phys. Rev., 2000, **C62**: 014301; XU F R, Walker P M, Wyss R. Phys. Rev., 1999, **C59**: 731; XU F R, Walker P M, Sheikh J A, Wyss R. Phys. Lett., 1998, **B435**: 257
- 55 ZHENG R R, LIAO J Z. Self-consistent Symmetry Projection Methods for Nuclei, Sichuan: Sichuan University Press, 1993 (in Chinese)  
(郑仁蓉, 廖继志. 原子核对称性投影自洽场方法. 四川: 四川大学出版社, 1993)
- 56 LIAO J Z. Science in China, 1999, **A29**(3): 252—257 (in Chinese)  
(廖继志. 中国科学, 1999, **A29**(3): 252—257)
- 57 ZHENG R R et al. Nucl. Phys. 1989, **A494**: 214—234; Schmid K W, ZHENG R R, Gruemmer F et al. Nucl. Phys. 1989, **A499**: 63—92
- 58 CHEN Y S, GAO Z C. Phys. Rev., 2001, **C63**: 014314
- 59 GAO Z C, CHEN Y S. Phys. Lett., 2006, **B634**: 195
- 60 Bohr A, Mottelson B R. Nuclear Structure, W. A. Benjamin, Inc, 1969, Vol.I Single-Particle Motion; 1975, Vol.II, Nuclear Deformations
- 61 Twin J et al. Phys. Rev. Lett., 1986, **57**: 811
- 62 Bentley M A et al. Phys. Rev. Lett., 1987, **59**: 2141
- 63 YANG C X, WU X G, ZHENG H et al., Eur. Phys. J. Phys., 1998, **A1**: 237—239; YANG C X, WEN S, LI S G et al., Chin. J. Nucl. Phys., 1994, **16**: 223—227
- 64 Tanihata I et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**: 2676
- 65 MENG J, Toki H, ZHOU S G et al. Prog. Part. Nucl. Phys., 2006, **57**: 470
- 66 MENG J, Ring P. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**: 3963; MENG J. Nucl. Phys., 1998, **A635**
- 67 MENG J, Ring P. Phys. Rev. Lett., 1998, **80**: 460
- 68 MENG J, Tanihata I, Yamaji S. Phys. Lett., 1998, **B419**: 1
- 69 MENG J, Toki H, ZENG J Y et al. Phys. Rev., 2002, **C65**: 041302R; ZHANG S Q, MENG J, ZHOU S G. Chin. Phys. Lett., 2002, **19**: 312; ZHANG S Q, MENG J, ZHOU S G. Science in China, 2003, **G46**: 632
- 70 MENG J, LÜ H F, ZHANG S Q et al. Nucl. Phys., 2002, **A722**: 366c
- 71 CAI X Z, ZHANG H Y, SHEN W Q et al. Phys. Rev., 2002, **C65**: 024610
- 72 LIU ZH, LIN C J, ZHANG H Q et al. Phys. Rev., 2001, **C64**: 034312
- 73 REN Z, Faessler A, Bobyk A. Phys. Rev., 1998, **C57**: 2752
- 74 MENG J, GUO J Y, LIU L et al. Frontiers of Physics in China, 2006, **1**: 38—46
- 75 CAO L G, MA Z Y. Phys. Rev., 2002, **C66**: 024311; Sandulescu N, GENG L S, Toki H et al. Phys. Rev., 2003, **C68**: 054323; ZHANG S S, MENG J, ZHOU S G et al. Phys. Rev., 2004, **C70**: 034308
- 76 LÜ H F, MENG J, ZHANG S Q et al. Euro. Phys. J., 2003, **A17**: 19; LÜ H F, MENG J. Chin. Phys. Lett., 2002, **19**: 1775
- 77 Myers W D, Swiatecki W J. Nucl. Phys., 1966, **A81**: 1
- 78 Sobiczewski A, Gareev F A, Kalinkin B N. Phys. Lett., 1966, **22**: 500
- 79 Nilsson S G, Nix J R, Sobiczewski A et al. Nucl. Phys., 1968, **A115**: 545; Nilsson S G, Tsang C F, Nilsson S G et al. Nucl. Phys., 1969, **A131**: 1
- 80 Yu. Ts. Oganessian, Lecture Notes in Physics (Springer, Heidelberg), 1975, **33**: 221
- 81 Hofmann S, Ninov V, Hessberger F P et al. Z. Phys., 1995,

- A350**: 277; Hofmann S, Ninov V, Hessberger F P et al. Z. Phys., 1995, **A350**: 281; Hofmann S, Ninov V, Hessberger F P et al. Z. Phys., 1996, **A354**: 229
- 82 Morita K, Morimoto K, Kaji D et al. Journal of the Physical Society of Japan, 2004, **73**: 2593—2596
- 83 GAN Z G, GUO J S, WU X L et al. Euro. Phys. J., 2004, **A20**(3): 385—387; GAN Z G, QIN Z, FAN H M et al. Euro. Phys. J., 2001, **A10**: 21—25
- 84 MENG J, Takigawa N. Phys. Rev., 2000, **C61**: 064319; LONG W H, MENG J, ZHOU S G. Phys. Rev., 2002, **C65**: 047306; GENG L S, Toki H, MENG J. Phys. Rev., 2003, **C68**: 061303(R); ZHANG W, MENG J, ZHANG S Q et al. Nucl. Phys., 2005, **A753**(1-2): 106—135
- 85 REN Z Z. Phys. Rev., 2002, **C65**: 051304(R); REN Z Z, TAI F, CHEN D H et al. Phys. Rev., 2003, **C67**: 064302
- 86 XU F R, ZHAO E G, Wyss R et al. Phys. Rev. Lett., 2004, **92**: 252501
- 87 ZHANG H F, LI J Q, ZUO W et al. Phys. Rev., 2005, **C71**: 054312
- 88 CHANG X U, REN Z Z. Nucl. Phys., 2005, **A753**: 174; CHANG XU, REN Z Z. Phys. Rev., 2006, **C73**: 041301(R); DONG T K, REN Z Z. Phys. Rev., 2005, **C72**: 064331; CHANG XU, REN Z Z. Phys. Rev., 2005, **C71**: 014309
- 89 LI Q F, ZUO W, WANG N et al. Eur. Phys. J., 2005, **A24**: 223—229
- 90 LI W F, WANG N, E G ZHAO et al. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 2006, **32**: 1143—1155
- 91 WU S S et al. J. Phys., 1990, **G16**: 1447
- 92 DONG Y B et al. J. Phys., 1992, **G18**: 75
- 93 WU S S et al. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 2006, **32**: 1269
- 94 WU S S et al. Eur. Phys. J., 1998, **A3**: 49
- 95 WU S S et al. Phys. Lett., 2001, **B514**: 33; WU S S et al. Nucl. Phys., 2001, **A694**: 489
- 96 WU S S et al. Eur. Phys. J., 1999, **A6**: 345
- 97 Day B D. Rev. Mod. Phys., 1967, **39**: 719
- 98 SONG H Q et al. Phys. Rev. Lett., 1998, **81**: 1584
- 99 ZUO W et al. Nucl. Phys., 2002, **A706**: 418
- 100 ZUO W et al. Phys. Rev., 2004, **C70**: 055802; ZHOU X R et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 018801
- 101 BAO C G et al. Phys. Rev. Lett., 1996, **76**: 3096; BAO C G et al. Phys. Rev. Lett., 1997, **79**: 3475; BAO C G et al. Phys. Rev. Lett., 1998, **80**: 464; BAO C G et al. Phys. Rev. Lett., 1999, **82**: 61
- 102 BES Collaboration(ZOU B S et al.). Phys. Lett., 2001, **B510**: 75
- 103 BES Collaboration(WANG J X, ZOU B S et al.). Phys. Rev. Lett., 2006, **97**: 062001
- 104 LIU B C, ZOU B S, Phys. Rev. Lett., 2006, **96**: 042002
- 105 ZOU B S, Riska D O. Phys. Rev. Lett., 2005, **95**: 072001
- 106 ZHANG Z Y et al. Nucl. Phys., 2003, **A705**: 455; WANG F et al. Phys. Rev. Lett., 1992, **69**: 2001
- 107 WANG P et al. Nucl. Phys., 2002, **A705**: 455
- 108 NING P Z et al. Phys. Rev., 2005, **C71**: 015206
- 109 LI G L. Progress in Physics, 1991, **11**: 331 (in Chinese) (厉光烈. 物理学进展, 1991, **11**: 331)
- 110 Haq R U et al. Phys. Rev. Lett., 1982, **48**: 1086
- 111 XU Gong-Ou. Quantum Chaotic Motion. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1995 (in Chinese) (徐躬耦. 量子混沌运动. 上海: 上海科学技术出版社, 1995)
- 112 LI J Q. Phys. Rev. Lett., 1997, **79**: 2387; LI J Q, LIU F, XING Y Z et al. Phys. Rev., 2002, **E65**: 047203 74; LI J Q. J. Phys., 1998, **G24**: 1021—1028; LI J Q, ZHU J D, GU J N. Phys. Rev., 1995, **B52**: 6458
- 113 WU X, GU J, ZHUO Y et al. Phys. Rev. Lett., 1997, **79**: 4542
- 114 GU J, Weidenmueller H A. Nucl. Phys., 1999, **A660**: 197
- 115 LIU W P et al. Nucl. Phys., 2003, **A728**: 275—284
- 116 ZHANG M J, ZHANG Bo, LI G L. HEP & NP, 2003, **27**: 978 (in Chinese) (张妙静, 张波, 厉光烈. 高能物理与核物理, 2003, **27**: 978)
- 117 SHEN G et al. Phys. Rev., 2005, **C71**: 015802
- 118 ZHOU X R et al. Phys. Rev. Lett., 2005, **95**: 051101

## Nuclear Structure Physics in China for the Last Two Decades

Nuclear Structure Division, Chinese Nuclear Physics Society

**Abstract** For the last two decades, dramatic progress has been made in China for the investigation of the nuclear structure and related fields. A brief review is given and the main focus will be on shell structure, rotation and vibration, pairing and superconductivity, high spin physics, superdeformed rotational nucleus, exotic nuclei with extreme isospin, superheavy nucleus, etc.

**Key words** nuclear structure physics, key discoveries, China